专刊：科技支撑“双碳”目标实现
S&T Supporting Realization of Carbon Peak and Carbon Neutrality Goals

基础前沿交叉创新
Cross-cutting Innovation in Basic and Frontier Areas

引用格式：于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径：基于自然解决方案. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501.
Yu G R, Zhu J X, Xu L, et al. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: Nature-based solutions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 490-501. (in Chinese)

中国生态系统碳汇功能提升的技术途径：基于自然解决方案

于贵瑞* 朱剑兴 徐 丽 何念鹏

中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室 北京 100101

摘要 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和已被确定为中国经济社会发展的重要战略目标。当前，中国陆地生态系统碳汇能力约为每年 10 亿—13 亿吨二氧化碳（CO_2）。巩固和提升生态碳汇功能，需要与国土空间规划和生态保护等相结合，稳定现有森林、草原、湿地、滨海碳碳汇，进而实施生态保护与修复等重大增汇工程，同时还需要推动生态系统管理及新型生物/生态碳捕集、利用与封存技术（Bio-CCUS/Eco-CCUS）的开发应用。通过统筹陆地-河流-海洋国土空间规划和各种增汇技术，有望实现中国区域生态系统自然和人为碳汇功能倍增目标，即在 2050—2060 年实现每年 20 亿—25亿吨 CO_2 的碳汇贡献。当前，亟待系统梳理生态系统碳汇提升关键技术，科学评估其增汇效应、经济可行性和时间可持续性，集成不同区域增汇技术并开展区域示范。

关键词 生态系统，碳汇，碳储量，生态关键带，碳循环，碳中和

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220121002

2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和已成为中国重要的长期战略目标，必须统筹“减排、保碳、增汇、封存”4 个技术途径的宏观布局，协调“脱碳能源转型、减排产业结构调整、增汇生态环境建设”3 个新型生态经济及产业的协同发展。陆地生态系统具有巨大的碳汇能力，巩固和提升其碳汇功能是实现碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”）目标的重要途径之一[1,2]。推进生态系统碳汇功能保护与提升的关键技术和优化模式的示范应用，研发生物和生态碳捕集、利用与封存（CCUS）新技术[3]是落实国家碳中和战略的

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金基础科学中心项目（31988102），国家自然科学基金（32171544、42141004）
修改稿收到日期：2022年3月25日

迫切需要。

生态系统碳循环过程、固碳机制和增汇原理，一直是近年的热点研究内容[4]。以往的立地尺度、景观尺度的生态学过程研究，以及区域生态系统与气候系统的反馈研究，已经奠定了区域固碳增汇技术研发的理论基础[5]。当前，巩固和提升生态系统碳汇功能的主要科技任务包括：① 强化国土空间规划和用途管控，严守生态保护红线，稳定现有森林、草原、湿地、滨海、冻土等生态系统的碳储量；② 实施自然保护工程与生态修复工程，提升生态系统质量及碳汇功能；③ 统筹现有天然生态系统、自然恢复的次生生态系统、人工恢复重建的生态系统等，综合提升碳汇能力[6,7]。

经过长期研究，科研人员针对不同类型的生态系统已开发出众多行之有效的碳保护及碳汇提升的技术方法。然而，在国家“双碳”目标下，如何有效评估这些技术的经济可行性、碳汇功能的稳定性和可持续性，以及在区域及全国范围集成应用和实验示范等问题尚未解决[8]。本研究重点围绕我国陆地生态系统的碳汇功能保护和提升关键技术及其示范应用开展讨论，旨在为国家制定国土空间规划和用途管控、生态保护修复重大工程及区域碳汇技术集成应用等提供参考。

1 基于自然解决方案的生态系统碳汇能力巩固和提升原则

在覆盖全国范围的陆地和滨海疆域内实施跨区域、跨行业的“双碳”行动，是一个涉及政治、经济、社会发展和生态建设的巨大生态系统工程，需要贯彻基于自然解决方案（nature-based solutions，NbS）的空间优化布局、资源环境合理配置的系统工程理念，普及生态系统碳库保护和碳汇功能提升关键技术。NbS 核心理念是尊重自然规律、依据自然条件、利用自然过程，因地制宜地制定基于生态系统途径的典型类型生态系统碳汇提升方案；以及在区域上制定基于宏生态系统途径的碳库保护和碳汇功能提升方案，优化管理区域的自然-经济-社会复合生态系统，以实现社会、经济和生态环境效益的协调统一。NbS 以生物圈与环境系统演变原理、宏系统间的偶联性原理、生态系统的整体性原理、人类与自然和谐共生理论为科学依据，构建山水林田湖草沙冰与人类社会的生命共同体，实现水-土-气-生的自然环境及资源时空格局优化配置。因此，在基于 NbS 制定不同区域及国家层面应对碳中和的生态系统碳汇提升方案时，需要遵循以下 4 个原则。

1.1 生态碳汇提升需要与国土空间主体功能区划相协调

提升生态系统碳汇的实施方案必须与现有的国土空间主体功能区划相协调，辨识出重要自然碳汇功能区、人工增汇功能区，进而融合到国家重要生态保护区、生态红线区及生态修复重大工程区的布局之中，强化国土空间范围内的各特定地域“山水林田湖草沙冰”和“洋海湾岛礁岸”的整体治理。中国的生态碳汇地理格局及自然区划是制定碳中和行动方案空间布局的基础。应按照自然地理条件，统筹规划国土空间的碳汇功能区域，优先选择重要生态关键带（ecologically critical zone），布局生态系统增汇技术集成模式的实验示范。

1.2 生态碳汇提升需要融入自然保护及生态建设事业

国家层次的生态碳汇巩固和提升战略，必须在整个国土空间上实施；而且，区域碳汇功能提升技术模式也必须依据区域自然地理条件决定的生态系统生产力和经济社会发展状况，其生态工程建设应满足于自然地理条件、经济社会状况及科学技术能力的约束[1]。中国的宏观地貌、地理和气候格局决定了主要碳汇功能区的基本空间格局[9,10]。广袤的山地森林具有强大的固碳功能，并且当前我国大多数山地森林还正处于生态恢复阶段，是重要的潜在增汇区。此外，

我国的海岸带、河岸带、交通线（路岸带）、城市绿地（绿化带）等是近年来的国土绿化重要区域，具有很大的增汇潜力。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035年）》提出的“三区”（青藏高原生态屏障区、黄河重点生态区、长江重点生态区）、“四带”（东北森林带、北方防沙带、南方丘陵山地带、海岸带）生态保护和修复规划是指导国家碳汇功能区规划基础，也是生态碳汇提升宏观决策的重要依据。

1.3 生态系统碳汇功能提升需要结合历史文化传承和乡村振兴行动

全国生态系统增汇工程布局应与自然和文化遗产保护、生物多样性保护和区域发展相结合。中国具有悠久的历史和文化遗产，许多地理空间不仅是自然和文化遗产的承载体和分布区，也是重要的生物多样性及生态碳汇功能区。保护分布在全国不同疆域、千姿百态的名山大川、祠院寺庙、遗迹等自然和文化遗产必须以对自然景观、生态系统及人文环境等载体的保护和恢复为前提，实现碳汇保持与人类文明延续相结合。与此同时，巩固拓展脱贫成果、全面推进乡村振兴战略是我国社会发展的重要目标。大别山区、大兴安岭南麓山区、滇桂黔石漠化区、滇西边境山区、西藏、新疆南疆四地州等14个原集中连片特困区面积约占国土总面积的41.74%，这些原集中连片特困区具有高碳储量、高人均碳汇能力的区域特征。因此，如何协调贫困区经济发展、资源开发利用、生态环境保护及巩固提升生态碳汇功能，备受政府和公众的关注。需要建立生态碳汇产品价值实现机制，通过碳汇交易、碳汇税、财政转移支付等机制，以保障贫困区经济发展与环境协调的双赢，实现“双碳”目标与生态恢复、美丽中国建设和乡村振兴的协同。

1.4 生态碳汇功能提升及实施应与区域生态系统管理相结合

巩固和提升生态碳汇功能区固碳能力的核心技术是基于自然的区域生态系统综合管理，普及和应用“生态保护-生态恢复-乡村振兴-保碳增汇”多目标兼容的区域生态管理模式。过去几十年来，我国在典型生态系统结构-过程-功能作用机制研究基础上，研发了农田土壤、人工林、天然次生林、草地、湿地、荒漠绿洲等生态系统固碳增汇技术，并针对不同地理区域研制了多样的生态系统管理模式，为各碳汇功能区的保碳增汇提供了丰富的技术储备（表1）。这些技术或模式大多具有长期观测试验基础，并经过观测数据验证。然而，当前的一些忽视自然规律、过度追求“人为碳汇”的行为却值得关注。例如，在干旱半干旱荒漠盲目地大规模种植森林或灌木林，不仅增汇效果十分有限，还会造成土壤流失和碳库丢失[11]。又如，一些地区以森林是重要碳汇为理由，将大面积湿地改为林地。这种土地利用转换（尤其在高海拔或高纬度地区）将会加速土壤有机质的分解，造成土壤碳汇丢失，其综合的增汇功能值得商榷[5]。

2 提升生态系统碳汇功能的途径及其关键技术

从《京都议定书》（1997年）、《哥本哈根协议》（2009年）到《格拉斯哥气候公约》（2021年），生态系统碳保护和增汇都被认为是最绿色、最经济、最具规模效益的技术途径[12,13]。过去几十年，中国生态环境建设取得了巨大成就，为生态碳库保护和碳汇能力提升奠定了基础，对构建当下的生态建设与固碳增汇协同的理论体系、应用技术和模式也具有重大意义。在此基础上，还应从地质系统碳循环、地表系统碳循环、生态系统碳循环、人文社会系统碳循环耦合的新视角，建立支撑“双碳”战略的地球系统碳循环的理论及人为调控体系。在致力于发展地质工程的CCUS理论和技术的同时[2]，更加重视新型基于生物学或生态学理论的CCUS（Bio-CCUS或Eco-CCUS）的开发应用。

表1　人为管理措施对生态系统碳汇效应的影响及其定性评价

Table 1　Effect of artificial managements on carbon sequestration of ecosystems and their qualitative evaluation

		技术措施	碳汇效应	技术成熟度	环境适应性	社会适应性	当前应用规模	固碳效应评价难度	综合评估指数	IPCC承认度（是/否）
森林生态系统	1	造林再造林	***	***	**	**	***	*	***	是
	2	退耕还林	***	**	***	**	**	*	***	是
	3	天然林保护	**	***	***	**	**	*	***	否
	4	森林抚育	**	**	**	***	**	**	**	否
	5	森林间伐	**	**	**	**	*	***	**	否
	6	人工林天然化	**	**	**	*	*	***	*	否
	7	速生丰产林建植	*	**	**	**	*	**	*	否
	8	林分优化/改造措施	*	*	*	*	*	***	*	否
草地生态系统	1	天然草地封育	***	***	***	**	***	**	***	否
	2	退耕还草	***	***	***	**	**	*	***	是
	3	退化草地恢复措施	**	**	**	**	*	***	**	否
	4	多年生混播草地建植	*	**	*	***	*	**	**	否
	5	高产人工草地建植	*	**	*	**	*	**	*	否
	6	合理控制放牧强度	*	*	**	**	*	***	*	否
	7	划区轮牧/延迟放牧	*	**	*	**	*	***	*	否
农田生态系统	1	秸秆还田	***	***	***	**	*	*	***	是
	2	施用有机肥	***	***	***	**	*	*	***	是
	3	少耕	**	***	**	**	***	**	**	是
	4	免耕	**	**	**	**	*	**	**	是
	5	轮作	*	***	**	***	**	***	*	是
	6	灌溉管理	*	**	*	**	*	***	*	是
湿地生态系统	1	湿地保育	***	***	***	**	***	**	***	否
	2	退田还湖	***	**	***	*	*	*	**	是
	3	退化湿地恢复	**	**	**	*	*	**	**	否
	4	湿地管理	*	*	*	*	*	***	*	否
	5	湿地间类型转变	*	*	*	**	*	***	*	否
	6	人工湿地	*	**	*	**	**	**	*	否
滨海（湿地）	1	湿地植被恢复	***	***	**	***	*	*	***	否
	2	贝类养殖	***	***	**	***	***	**	***	是
	3	海藻养殖	***	***	**	**	***	***	**	否
	4	珊瑚礁重建	**	**	*	*	*	***	*	否

注：碳汇效应，指管理措施实施后的固碳速率；技术成熟度，指管理措施在技术上是否成熟；环境适应度，指管理措施是否对环境具有较高适应性；社会适应性，指从社会法规、公众行为和经济角度考虑管理措施是否适合推广；当前应用规模，指管理措施在我国各类生态系统中的应用或推广情况；固碳效应评价难度，指基于现有技术水平准确地评估其碳汇效应的难度；综合评估指数，指根据前6项评价指标对管理措施碳汇效应的综合评估（即是否提倡）；IPCC承认度，指该项管理措施是否能在目前IPCC（联合国政府间气候变化专门委员会）清单编制中使用；各项管理措施碳汇效应的定性评价分为3级，针对每类生态系统的管理措施分别赋值，并用星号数量表示优劣度；其中，除评估难度外，星号越多则表明该管理措施具有更强的碳汇效应或更适合推广

Note: carbon sink effect, the carbon sequestration rate after the implementation of management measures; technology maturity, whether the management measures are technically mature; environmental fitness, whether management measures have high adaptability to the environment; social adaptability, whether management measures are suitable for promotion from the perspective of social regulations, public behavior, and economy; current application scale, the application or promotion of management measures in China; the difficulty of assessing carbon sequestration effect, the difficulty of accurately assessing carbon sequestration effect based on existing technology level; comprehensive evaluation index, the comprehensive evaluation of carbon sequestration effect of management measures based on the six evaluation indexes; IPCC commitment, whether the management measure can be used in the current inventory of the IPCC (Intergovernmental Panel of Experts on Climate Change). The qualitative evaluation of carbon sink effect of all management measures was divided into three levels, and values were assigned to the management measures of each ecosystem.The more asterisks, the stronger carbon sink effect or more suitable for promotion of the management measures.

2.1 传统的农林业减排增汇技术途径

传统的农林业减排增汇技术，主要包括造林、再造林和森林管理、农业保护性耕作、畜牧业减排、草地和湿地管理、滨海生态工程（如蓝碳养殖业）等绿色低碳减排或增汇技术措施[8,12]。当前应致力于应用和发展的技术措施包括：① 实施生态保护修复重大工程，开展不同地理单元的山水林田湖草沙冰一体化保护和修复，持续增加森林面积和蓄积量。② 大力推进国土绿化行动，巩固退耕还林还草成果，实施森林质量精准提升工程。③ 采取多样化的森林经营和管理措施，如延长森林间伐时间、人工林抚育、防火和病虫害防治等。④ 加强草原生态保护修复，强化内陆河岸、湖泊和沼泽湿地保护。⑤ 整体推进滨海（湿地）生态保护和修复，尤其是红树林、海草床、盐沼等保护。⑥ 开展耕作制度变革及耕地质量提升行动，实施黑土、黄土和红壤的保护工程，提升土壤碳库及其稳定性。⑦ 加强内陆盐碱土和岩溶区域地质碳汇功能的研究与开发（表 1）。

相关研究表明，农业的保护性耕作和有机肥使用等措施的固碳潜力每年约 1.4 亿—1.7 亿吨 CO_2[14]；草地围栏和种草等措施的固碳潜力每年约 0.6—0.8 亿吨 CO_2[8,15,16]。然而，上述这些增汇潜力还都是基于小范围、短时间的调查结果推测获得，仍存在较大的不确定性，并且其经济可行性尚待研究。

2.2 生态工程的增汇途径

生态工程增汇模式的构建需要统筹国土空间绿化与生态环境治理，围绕提升森林、农田、草地、荒漠、内陆湿地、湖泊、滨海湿地、近海养殖业等生态碳汇功能，挖掘现有成熟技术，整合形成适用于景观、流域到区域的系统化技术模式。应充分总结各类生态系统定位观测、研究和增汇相关技术研发和示范成果，汇集碳汇功能提升的技术模式库，支撑区域碳汇综合示范。

过去几十年，科学家已经发展和系统总结了众多行之有效的生态增汇措施（表 1），如造林再造林、退耕还林、天然草地封育等[6,8]。然而，在落实碳中和战略的应用过程中，亟待科学评估这些增汇技术的碳汇效应、时间可持续性、空间适用性、经济可行性，分级和分类型地推荐可以大规模推广的生态工程增汇措施。我国的新增造林、路岸河岸带和城市绿地生态建设规模还在不断增大，依据国家统计的各省新造林和城市绿地面积，结合各区域所对应的固碳速率分析表明，实施新规划的生态恢复和国土绿化工程具有巨大的固碳潜力，新增造林及城市绿地预计具有每年 0.3 亿—0.8 亿吨 CO_2 的固碳潜力[17]。

2.3 新型生物/生态碳捕集、利用与封存途径

Bio-CCUS 或 Eco-CCUS 是指通过提升陆地生态系统生产力途径来更多地固定大气 CO_2，并将其转换为有机生物质，进而作为能源、化工或建筑材料替代化石产品，或直接埋藏或地质封存。光合作用是地球上最大规模的能量和物质转换过程，是高效转换光能固定 CO_2 的自然过程，可为 Bio-CCUS 或 Eco-CCUS 提供充足原料。

（1）利用分子生物学原理，研发高新生物固碳技术。分子生物学的转基因及分子设计等技术正在快速发展，为开发生物碳汇封存提供了潜在技术，在构建 CO_2 高效生物利用或封存的技术模式集成体系方面具有广泛的应用前景。潜在的技术突破包括：① 利用分子生物学的技术改良光合生物的捕光、固碳和代谢途径，提升生物光合固碳效率；② 改良筛选出更高效的固碳、抗盐碱或抗干旱的树种和草种；③ 有可能培育出高效固碳且减污的微生物或水生植物。

（2）基于现代生物合成原理，开发人工模拟光合作用新技术。现代生物技术的发展为生物改良及模拟光合作用的技术突破提供了条件。人工利用和模拟生物光合作用，将阳光、水和 CO_2 转化为碳水化合物的技术突破，有可能为 Bio-CCUS 或 Eco-CCUS 提供颠覆性关键技术。潜在的技术突破领域包括：① 发展化学

与生物催化相耦合技术，构建形成简单的固碳淀粉人工合成途径[18]。② 挖掘生物酶催化剂，突破自然界淀粉合成的复杂调控障碍。③ 开发模块组装优化与时空分离策略，解决人工碳固定途径中的底物竞争、产物抑制等问题。④ 突破应用技术的成本限制，提高人工固碳技术的应用价值和产业化进程。

*（3）利用污染或废弃地等土地资源，发展生物/生态固碳技术。*中国存在一些污染土地、污染湿地、废弃矿区等土地资源。这些土地虽然不适合种植人畜食用的农作物，但可以用于种植高光效的高生物量植物（如杨树、芨芨草、蓖麻、玉米、甜高粱、甘蔗等）；这些植物生产的生物量既可以作为生物能源和生物化工原料，也可以将收获物压缩为颗粒或者炭化后直接埋藏，实现长期的碳封存。以种植玉米或高粱为例，每公顷每年可收获秸秆和籽粒 30 吨，其年净碳固持速率可达 49.4 吨 CO_2/公顷；如果按 CCUS 途径的每吨 CO_2 的价格为 1 300—2 000 元计算，则其单位面积的碳汇经济效应甚至会超过传统农业种植的经济价值。

*（4）利用农业和林业残余生物量，发展生物/生态固碳技术。*森林和农田生态系统每年会产生大量的废弃物或秸秆生物质，是巨大的生物资源。Yan 等[19]通过生物量热值研究发现中国陆地生态系统每年新增有机物质积累非常巨大；因此，利用好森林更新、砍伐、抚育所移除的生物量将提供巨大的生物质替代能源，助力“双碳”目标的实现。根据相关研究，中国现存林植被生物量增长速率在 2035—2040 年有可能达到峰值[11,20]。因此，需要采用必要的次生林抚育及合理的采伐才能够稳定和提升其生产力，同时这也有利于防止森林火灾和病虫害导致的碳泄漏。这个研究结果为未来的森林木材择伐或抚育提供了理论依据，也为开展森林生物量的生物质发电或生物碳封存技术开发等提供应用前景。假设将当年森林生产力的 1/4 移除生态系统，则其规模可能在 3 亿立方米木材（或当量的枝叶）左右，相当于每年约有 2.7 亿—3.0 亿吨 CO_2 的森林生物量可以被用于 Eco-CCUS。另外，我国的粮食年产量约 6.5 亿吨，其作物秸秆年生产量约 10.7 亿吨 CO_2；若扣除用于秸秆还田、农村家庭能源利用、牲畜消耗的量（约为总量的 70%）将剩余 30% 的秸秆用于 Eco-CCUS，其年增汇潜力最高可达 3.2 亿吨 CO_2。类似地，加强废弃家具、建筑材料等封存处理，也将是一项不可忽视的碳汇。

3 中国生态碳汇功能提升的整体目标及实现途径

确定中国的生态碳汇功能提升目标及实现途径是极具挑战的科学问题。这里我们采用 NbS 的碳中和理念和已有数据的粗略估计，提出一个潜在的中国生态碳汇功能提升目标。虽然该目标的设定具有较高的不确定性，还有待后续科学研究的确定及社会实践的证实，但可以作为我国巩固提升生态碳汇功能的参考愿景。

3.1 现有的生态系统碳库、碳汇能力及功能提升目标

过去 30 年，中国生态建设极大地提升了陆地生态系统的碳汇功能。森林普查数据显示，中国的森林面积从 1973—1976 年的 1.1712 亿公顷，增加到 2014—2018 年左右的 1.7989 亿公顷，森林生物量在过去 40 年间增加了 140 亿吨 CO_2[21]。《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》指出，森林的蓄积量计划在 2021—2025 年进一步达到 190 亿立方米，这是一个举世瞩目的工程。基于遥感数据的研究表明，2000—2017 年，全球绿地面积增加了 5%，而中国的贡献率约为 25%[22]。

生态系统的碳储量、固碳能力及固碳潜力预测是一个复杂的科学问题。根据现有的研究结果，中国区域已经被确认的陆地植被、凋落物和 0—1 米深度土壤的有机碳储量约 3 633±209 亿吨 CO_2；其中，植被的有机碳储量为 498±119 亿吨 CO_2，土壤为 2 988±186 亿

吨 CO_2。当前，还没有被确认的深层土壤有机碳约为2 667亿吨 CO_2，泥炭地有机碳约为551亿吨 CO_2，各类动物有机碳储量约为1亿吨 CO_2。此外，1米深度的土壤无机碳约为1 727亿吨 CO_2，0—2米深度的土壤无机碳约1 954亿吨 CO_2（图1）。

不同统计方法估算的陆地生态系统碳汇效应具有很大的差异，已确认的现有陆地有机碳汇大约为每年10亿—15亿吨 CO_2[15,23-25]，保守的估计大约为每年10亿—13亿吨 CO_2。根据各种相对可靠的信息判断，在统筹陆地-河流-海洋国土空间的有机和无机碳汇的思路下，在现有的碳汇能力基础上，进一步通过碳汇认证、增汇工程、生态管理，以及Bio-CCUS或Eco-CCUS等措施的综合运用，有望实现中国生态碳汇功能的倍增目标，即在2050年前后，将中国区域的综合生态碳汇能力提升到每年20亿—25亿吨 CO_2 的水平。

整理分析文献数据表明，目前还未被确认的陆地和海洋有机碳汇功能约为每年3.46亿吨 CO_2；其中，城市绿地碳汇约为0.29亿吨 CO_2，海岸带生态系统蓝色碳汇约为0.7亿—0.9亿吨 CO_2、近海海域海洋的碳汇量约为2.2亿—2.4亿吨 CO_2。因此，可以判断2010—2020年的陆地和海洋实际有机碳汇能力为每年15亿—16吨 CO_2[26-29]。此外，大量研究还表明，我国的荒漠盐碱地、喀斯特岩溶区、黄土高原等地区无机碳汇，滨海海岸带蓝色碳汇，以及近海海洋碳汇具有较大的无机碳汇功能。初步估计认为，中国区域的无机碳汇约为每年1.6亿—1.9亿吨 CO_2，其中碳酸盐岩风化作用的无机碳汇约1.78亿吨 CO_2[30-32]。

3.2 中国区域生态碳汇功能区提升目标的实现途径

要实现中国区域的生态碳汇功能区提升目标，需要在综合利用传统的农林业减排增汇技术途径、生态工程的增汇途径、Bio-CCUS或Eco-CCUS，以及评估遴选、开发创新生态碳汇关键技术，并综合集成为技术可行、经营有效、便于推广的兼容生态建设或管理模式，因地制宜地在不同类型重要碳汇功能区普及应用，全面推进国家、区域的自然保护及增汇技术示范应用。

生态系统碳汇地理格局及自然区划是制定碳中和行动空间布局的基础。区域增汇技术综合示范的任务包括：① 开展区域综合调查，摸清碳汇本底；在此基础上，结合区域自然地理条件、社会经济发展需求和已有的生态保护和修复工程，制定区域碳汇功能提升的目标和实施期限。② 根据区域自然地理条件和社会经济水平，结合区域生态功能定位，在区域适用性评估的基础上遴选增汇技术模式进行区域综合集成，形成系统的区域增汇

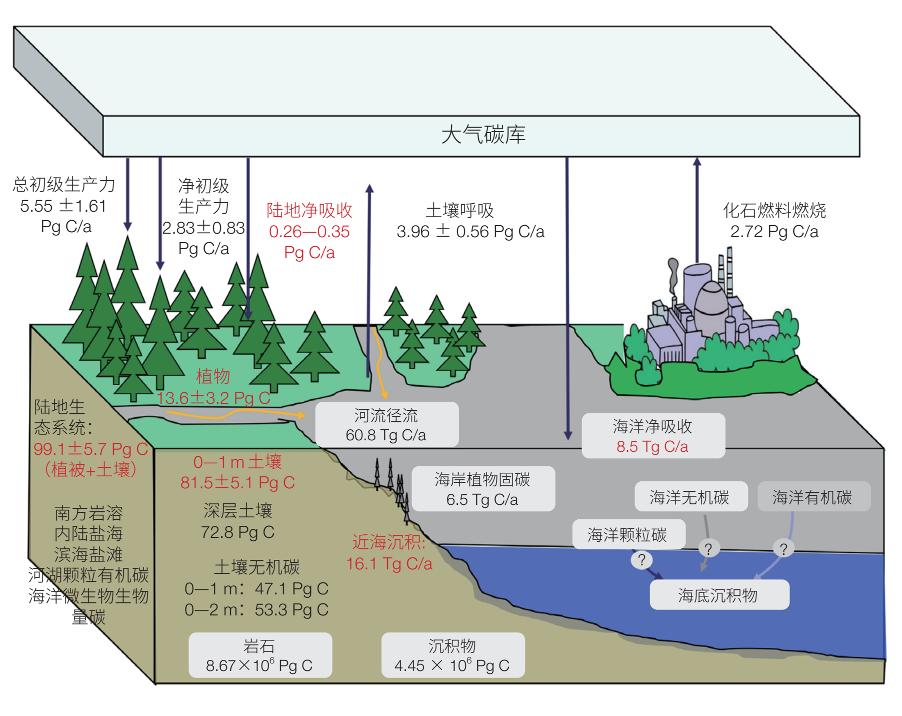


图1　中国陆地-海洋的生态系统碳储量、固碳效应及固碳潜力的预估

Figure 1　Primary estimates of ecosystem carbon storage, carbon sink, and carbon sequestration potential in land and coast in China

技术模式体系示范。③ 在碳汇立体监测体系的支持下，对区域碳汇的动态进行跟踪观测与评估，获取增汇技术示范期间碳汇效应、其他生态功能及经济社会功能的变化过程。④ 在增汇技术示范末期结合碳汇清查和碳汇立体观测，依托碳汇数据模型平台，对区域增汇效果进行综合评估，提炼政策建议和制定技术标准。

中国的重要碳汇功能区域增汇综合示范，是在社会系统和生态系统相互作用框架下的立地、景观到区域多尺度整合的增汇技术体系的实践应用，需要改变传统增汇技术应用的片段化、难以覆盖碳汇形成全过程的局面。已有研究发现：森林特别是中国近几十年来大量种植的人工林和抚育的天然次生林发挥着重要的碳汇功能；草原除了高寒草甸外整体上被认为是碳中和的；湿地整体上被认为是碳源；农田土壤是碳源还是碳汇主要却决于农业技术模式和区域环境条件[5,14,17]。目前，经过长期的科学研究和应用积累，对生态系统增汇、产业减排等区域碳循环过程的调控技术研发已经有很好的基础，而按照区域碳循环的空间格局进行增汇技术的整合仍面临着巨大的挑战。

3.3 制定国家层次生态系统增汇的系统布局方案的科技需求

《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》明确了各行业需要统筹布局、山水林田湖草综合治理的工作原则，还设定了各时期的阶段工作目标，如我国森林覆盖率 2025 年和 2030 年分别达到 24.1% 和 25% 左右。我国前期的多项工作都为提升碳汇功能的全国统一布局打下了良好基础。同时，以往的重大生态工程也为区域碳汇能力增强提供了保障，包括“三北”防护林、南方红黄壤恢复区等都已经发挥了巨大的增汇作用。近期我国推出的长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”战略、黄河流域生态保护和高质量发展战略都是以各地生态保护为前提的，而生态大保护也为进一步巩固和提升生态系统碳汇功能带来了契机。

然而，历时 50 年、覆盖全国的巨大生态碳汇工程需要与自然环境保护、生态环境治理、区域可持续发展、乡村振兴等国家战略关联互动，也必将会对国家及区域的水安全、粮食安全、资源安全格局产生重大影响；要制定提升碳汇功能、改善生态环境、促进区域发展的多目标系统方案还需要强有力的科技支撑，其中理论认知、技术集成、观测认证、核算评估是 4 项基本科技任务。

（1）生态系统循环及增汇技术原理的理论认知。认知生态系统碳汇形成的过程机制、动态演变、地理分布、经营管理原理是巩固和提升生态碳汇的生态学基础。国家的碳汇管理需要以生态系统碳循环理论为指导，以对碳汇功能动态监测、增汇潜力定量认证、技术模式应用功效评价为依据，推进局地、区域、国家不同层级的社会实践。其基础科学问题主要包括：① 生态碳汇巩固或增汇技术措施的有效性、可行性和经济性；② 碳汇功能评估的确定性、时空格局的变异性、技术效果的持续性；③ 生态系统的稳定性、对人为影响的敏感性、对环境变化的适应性（图 2）。

（2）生态系统碳汇巩固和提升的技术集成。在广袤的国土空间巩固和提升生态系统碳汇功能，需要丰富多样的关键技术及生态系统管理模式应用与示范。传统的农林业减排增汇技术及生态工程增汇技术被认为是技术成熟度最高、经济成本最低、最易普及、规模效应最大的生态系统固碳增汇技术体系。但是，还需要因地制宜地对潜在增汇技术措施的有效性、可行性和经济性进行论证，形成有效的技术模式，并通过实验和示范使其得到普及应用[8]。与此同时，更需要前瞻布局具有潜力的 Bio-CCUS 或 Eco-CCUS 技术开发，为碳汇倍增目标的实现做好技术储备。

（3）生态系统碳汇巩固和提升的观测认证。要制定和实施有效的系统方案，必须发展区域和国家的网络化动态立体监测体系，建立典型生态系统、区域及

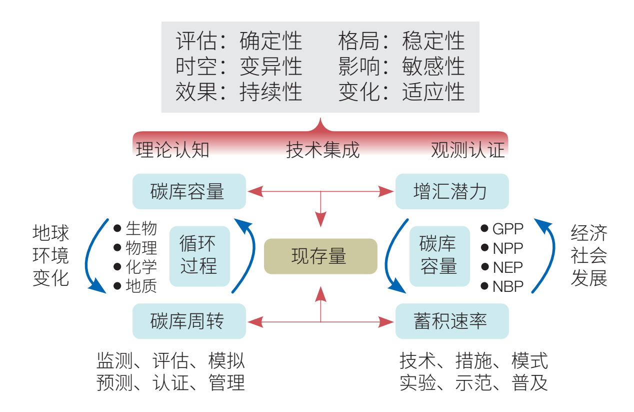


图 2　保护生态系统碳库及提升碳汇功能的生态学理论及前沿科学技术

Figure 2　Ecological theories and frontier technologies to protect carbon storage and enhance carbon sink in Chinese terrestrial ecosystems

GPP，生态系统总初级生产力；NPP，生态系统净初级生产力；NEP，净生态系统生产力；NBP，净生物群区生产力

GPP, gross primary productivity; NPP, net primary productivity; NEP, net ecosystem productivity; NBP, net biome productivity

全国的碳汇功能监测技术，发展自然和社会复合生态系统过程模拟分析系统，发展生态-气候-社会复合系统演变的预测理论和方法。面对我国复杂的地理格局及经济社会发展水平的区域差异，统筹分析各区域及各发展阶段所面临的生态环境问题，预测各类生态碳汇工程的碳汇效益及生态环境效应，认知区域的生态系统碳循环过程及其机制的特殊性，认证生态碳汇工程的技术经济的可行性、碳汇效应及生态环境的潜在影响，为国土空间的生态工程优化布局和实施效果评估提供科学依据。

（4）生态系统碳汇巩固和提升的核算评估。生态系统碳汇技术、措施和模式的效应评估、碳汇认证及区域和工程管理是推动区域碳汇功能提升的重要任务。迫切需要发展和完善不同类型及区域生态系统碳汇评估方法，构建不同途径的增汇技术、措施及模式的碳汇效应计量、评估和核查的方法学及技术标准体系。同时，应特别重视建立各种人为增汇技术和措施的碳汇核算方法、气候效果的认证和评估技术标准，发展可报告、可计量和可核查的技术体系，建立国内外通用的碳汇交易的计量、核算及价值评估体系。

4 结语

中国生态系统具有巨大的碳汇效应且具有很大的提升空间，在国家的“双碳”目标实现中将扮演重要角色。通过巩固和提升生态系统碳汇功能，有望为我国工业减排保留每年 20 亿—25 亿吨 CO_2 的排放空间。可以认为这是中国“双碳”战略行动的“压舱石”和“稳压器”，因为生态系统碳汇不仅可以为清洁能源和绿色技术创新和发展赢得宝贵的缓冲时间，更重要的是可为国家的经济社会系统稳定运行提供基础性的能源安全保障。然而，中国未来的生态系统碳储量、固碳能力和固碳潜力的预估，以及生态碳汇提升行动方案的制定既是一个复杂的科学问题，又是一个涉及全局、全民及涵盖全域国土空间的经济社会长期发展和社会实践问题。虽然过去 30 余年我国的生态恢复取得了巨大成绩，生态系统碳汇能力也得到了较大的提升，但要实现国家“双碳”战略行动的生态系统碳汇倍增目标仍然是极其艰巨的重大任务，需要强大的科技支撑、国家引导、公众参与、财政投入。

参考文献

1 于贵瑞, 何念鹏, 王秋凤. 中国生态系统碳收支及碳汇功能：理论基础与综合评估. 北京: 科学出版社, 2013.
Yu G R, He N P, Wang Q F. Carbon budget and carbon sink of ecosystems in China: Theoretical basis and comprehensive assessment. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)

2 Wang F, Harindintwali J D, Yuan Z Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. The Innovation, 2021, 2(4): 100180.

3 Mallapaty S. How China could be carbon neutral by mid-century. Nature, 2020, 586: 482-483.

4 IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis// Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. (Ed). Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.

5 于贵瑞, 赵新全, 刘国华. 中国陆地生态系统增汇技术途径及其潜力分析. 北京: 科学出版社, 2018.

Yu G R, Zhao X Q, Liu G H. Approaches for Increasing Carbon Sink of Terrestrial Ecosystems in China and Its Potential. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)

6 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力的概念框架及其定量认证科学基础. 地理科学进展, 2011, 30(7): 771-787.

Yu G R, Wang Q F, Liu Y C, et al. Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentification. Progress in Geography, 2011, 30(7): 771-787. (in Chinese)

7 He H L, Wang S Q, Zhang L, et al. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. National Science Review, 2019, 6(3): 505-514.

8 何念鹏, 王秋凤, 刘颖慧, 等.区域尺度陆地生态系统碳增汇途径及其可行性分析. 地理科学进展, 2011, 30(7): 788-794.

He N P, Wang Q F, Liu Y H, et al. The approaches to enhance carbon sequestration of terrestrial ecosystem at regional scales, and their feasibility. Progress in Geography, 2011, 30(7): 788-794. (in Chinese)

9 Chen Z, Yu G R, Ge J P, et al. Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182/183: 266-276.

10 Yu G R, Chen Z, Piao S L, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. PNAS, 2014, 111(13): 4910-4915.

11 Cai W X, He N P, Li M X, et al. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: Spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. Science Bulletin, 2022, doi: 10.1016/j.scib.2021.12.012.

12 IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

13 Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2℃. Nature, 2016, 534: 631-639.

14 Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands. PNAS, 2018, 115(16): 4045-4050.

15 He N P, Yu Q, Wu L, et al. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of Northern China. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(12): 2952-2959.

16 Hu Z M, Li S G, Guo Q, et al. A synthesis of the effect of grazing exclusion on carbon dynamics in grasslands in China. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1385-1393.

17 Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. PNAS, 2018, 115(16): 4039-4044.

18 Cai T, Sun H B, Qiao J, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide. Science, 2021, 373: 1523-1527.

19 Yan P, Xiao C W, Xu L, et al. Biomass energy in China's terrestrial ecosystems: Insights into the nation's sustainable energy supply. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109857.

20 He N P, Wen D, Zhu J X, et al. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050. Global Change Biology, 2017, 23(4): 1575-1584.

21 Zhang C H, Ju W M, Chen J M, et al. Disturbance-induced reduction of biomass carbon sinks of China's forests in recent years. Environmental Research Letters, 2015, 10(11): 114021.

22 Chen C, Park T, Wang X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2: 122-129.

23 Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458: 1009-1013.

24 Tang X L, Zhao X, Bai Y F, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey. PNAS, 2018, 115(16): 4021-4026.

25 Xu L, Yu G R, He N P, et al. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis. Scientific Reports, 2018, 8:

2806.

26 Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. Nature, 2020, 586: 720-723.

27 Wang F M, Sanders C J, Santos I R, et al. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. National Science Review, 2020, 8(9): nwaa296.

28 Gao Y, Zhou F, Ciais P, et al. Human activities aggravate nitrogen deposition pollution to inland water over China. National Science Review, 2019, 7(2): 430-440.

29 Gao Y, Jia J J, Lu Y, et al. Determining dominating control mechanisms of inland water carbon cycling processes and associated gross primary productivity on regional and global scales. Earth-Science Reviews, 2021, 213: 103497.

30 Li H W, Wang S J, Bai X Y, et al. Spatiotemporal distribution and national measurement of the global carbonate carbon sink. Science of the Total Environment, 2018, 643: 157-170.

31 Li H W, Wang S J, Bai X Y, et al. Spatiotemporal evolution of carbon sequestration of limestone weathering in China. Science China Earth Sciences, 2019, 62(6): 974-991.

32 白晓永, 王世杰, 曹建华, 等. 岩石风化碳汇与气候变化. 北京: 科学出版社, 2021.

Bai X Y, Wang S, Cao J H, et al. Carbon Sink of Rock Weathering and Climatic Change. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)

Technological Approaches to Enhance Ecosystem Carbon Sink in China: Nature-based Solutions

YU Guirui* ZHU Jianxing XU Li HE Nianpeng

(CAS Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling,
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract "Carbon peak in 2030 and carbon neutralization in 2060" has been established as one of the important strategic goals of China's economic and social development. During 2010–2020, the capacity of terrestrial ecosystems in China to sequester carbon dioxide (CO_2) varied from 1.0 to 1.3 Gt/a, with high uncertainty. To enhance the carbon sink capacity of Chinese terrestrial ecosystems, the combination with land space planning and ecological protection is essential. It is necessary to first stabilize the existing carbon storage in these ecosystems, such as forest, grassland, wetland, coast, and others, and then implement some important ecological protection and ecological restoration projects at large scale. In addition, new technologies of carbon capture, utilization, and storage based on biological CO_2 fixation principles (Bio-CCUS) or ecological CO_2 fixation principles (Eco-CCUS) should be developed and applied. Through integrated regional ecosystem management and spatial planning, as well as multiple technologies to enhance carbon sink, it is possible to double the carbon sink capacity, both natural and human-made, arriving at 2.0–2.5 Gt/a during 2050-2060. In practice, we need to scientifically assess the key technologies of ecosystem carbon sink improvement in view of effectiveness, economic feasibility, and durability, and then comprehensively integrate these technologies into different regions for demonstrations at regional scale.

Keywords ecosystem, carbon sink, carbon storage, ecologically critical zone, carbon cycle, carbon neutrality

*Corresponding author



于贵瑞 中国科学院院士，发展中国家科学院院士。中国科学院地理科学与资源研究所研究员、主要研究领域：生态系统生态监测与管理、生态系统碳氮循环与碳汇效应。主持科学技术部重大基础研发、国家自然科学基金重大项目、中国科学院战略性先导科技专项等20多项重大课题，参与多项国家科技政策起草、制定与评估工作。E-mail: yugr@igsnrr.ac.cn

YU Guirui Academician of Chinese Academy of Sciences (CAS), Fellow of the World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries (TWAS), and Professor of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS. Prof. Yu's research mainly focuses on ecosystem monitoring and management, carbon and nitrogen cycle of terrestrial ecosystems, and their carbon sink effect. In past decades, he has presided over a number of major national scientific research projects, sponsored by the National Key Basic Research Program of China (973 Program), Key Research and Development Project, the Major Project of National Natural Science Foundation of China, and the Strategic Priority Research Program of CAS. Furthermore, He has been involved in drafting, formulating and evaluating a number of national science and technology policies. E-mail: yugr@igsnrr.ac.cn

■责任编辑：岳凌生